



*Nascita delle stelle nelle Nubi di Magellano*

# La Teoria del Tutto

***L'UNIFICAZIONE DELLE FORZE E L'ORIGINE DELL'UNIVERSO  
NEL PENSIERO DI STEPHEN HAWKING***

*“Siamo solo una specie evoluta di scimmie su un pianeta minore di una stella media.  
Ma siamo in grado di capire l'universo.  
Questo ci rende qualcosa di molto speciale” (Stephen Hawking)*

**BERNASCONI COSTANZA  
CLASSE 5<sup>E</sup>  
a. s. 2019/2020**

**La storia della fisica è una storia di unificazione delle forze** e una delle sfide fondamentali della fisica contemporanea costituisce un vero e proprio problema filosofico: l'unificazione delle due grandi teorie che permetterebbero di comprendere tutti i fenomeni della natura che siamo in grado di spiegare, ovvero l'unificazione della meccanica quantistica e della relatività generale, o, allo stesso modo, l'unificazione dell'interazione gravitazionale con le altre tre interazioni fondamentali, ovvero l'elettromagnetismo, la forza nucleare debole e la forza nucleare forte, unificate nella GUT (Grande Teoria Unificata), nonostante non se ne abbia ancora avuto attualmente una conferma sperimentale. L'obiettivo dei fisici infatti è quello di trattare il maggior numero possibile di fenomeni attraverso il minor numero possibile di teorie generali, tendendo verso uno schema di unificazione che sia in grado di risalire all'origine dell'Universo attraverso un'unica forza. Questa teoria unificata che sarebbe in grado di inglobare tutte quelle scoperte compiute fino ad oggi e di spiegare nel suo complesso la natura e l'universo è stata battezzata **“The Theory of Everything” (TOE)**.

**Stephen Hawking**, uno dei fisici più conosciuti dell'era moderna, con il saggio **“La Teoria del Tutto. Origine e destino dell'universo”**, pubblicato nel 2002, raccoglie il contenuto di sette lezioni tenute a Cambridge prima del 1996, nelle quali, partendo dalla cosmologia di Aristotele, attraverso le teorie di Copernico, Newton e di Einstein, fino alle frontiere della fisica contemporanea, descrive le concezioni dell'universo sostenute nel passato e la sua immagine attuale, prefigurando la possibilità per la scienza di poter elaborare una teoria definitiva sulla natura dell'universo, una teoria di unificazione delle forze.

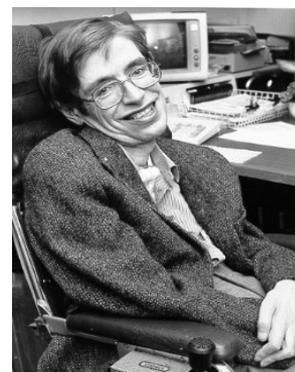


Figura 1  
Stephen Hawking

Hawking nel corso di queste lezioni sostiene la necessità di unificare la relatività generale con la meccanica quantistica per poter avere una corretta immagine del nostro universo. Per raggiungere tale risultato egli va ad analizzare due problemi della fisica: il fenomeno del **Big Bang** e quello dei **buchi neri**. Stando alla relatività generale, entrambi i fenomeni implicherebbero delle singolarità con densità infinita e curvatura spazio-temporale infinita, in corrispondenza delle quali le leggi della fisica verrebbero meno, concludendo quindi che la relatività generale perde la sua validità ai limiti della singolarità. Essendo quindi entrambe delle singolarità, presentano delle affinità; ad esempio secondo la teoria della censura cosmica, in una soluzione realistica, le singolarità si troverebbero sempre o interamente nel futuro (collasso gravitazionale) o interamente nel passato (Big bang); in più i buchi neri di piccola massa si sono probabilmente formati nelle condizioni di temperature e pressioni elevatissime dei primissimi stadi dell'universo; conseguenza di queste condizioni iniziali è che probabilmente l'universo primordiale non era uniforme, ma presentava delle irregolarità.

Come si possono spiegare quindi i primi istanti di vita dell'universo se le leggi della fisica, e in particolare la relatività generale, in corrispondenza di una singolarità con densità infinita e curvatura spazio-temporale infinita perdono la loro validità? O si assume che questa singolarità non rientra nel dominio della fisica, rinunciando in questo modo a comprendere com'è nato l'universo e cosa si cela dietro l'orizzonte degli eventi di un buco nero, oppure si deve ricorrere alla combinazione della relatività generale con il principio d'indeterminazione della meccanica quantistica.

A favore di questa tesi Hawking presenta le sue scoperte relative ai buchi neri, compiute a partire dai primi anni Settanta e si concentra in particolare sulla sua più grande intuizione, la **radiazione di un buco nero**, rinominata poi, in suo onore, **radiazione di Hawking**. Nel libro viene raccontata tutta la genesi della scoperta: egli intuì che l'orizzonte degli eventi è costituito dalle traiettorie dei raggi di luce che, avvicinandosi al buco nero, sono rimasti sospesi sul suo margine esterno; questi raggi di luce che formano l'orizzonte degli eventi non si possono mai scontrare tra di loro, proprio perché altrimenti cadrebbero entrambi nel buco nero e non si troverebbero sul suo confine, come da definizione. Di conseguenza, con il passare del tempo, l'area delimitata da questo orizzonte degli eventi potrà soltanto rimanere la stessa, o aumentare la propria estensione, ma mai diminuire; l'area dell'orizzonte degli eventi inoltre crescerebbe ogni qual volta una certa quantità di materia venisse a cadere in un buco nero. La proprietà dell'area di un buco nero ricorda il comportamento della quantità fisica chiamata entropia, che misura il grado di disordine di un sistema, il cui comportamento è espresso dalla seconda legge della termodinamica, la quale afferma che l'entropia di un sistema isolato non diminuisce mai al passare del tempo; inoltre, quando due sistemi si uniscono, l'entropia del sistema combinato è maggiore della somma delle entropie dei sistemi di partenza presi singolarmente. Tornando ora all'area dell'orizzonte degli eventi, questa può essere identificata secondo questo parallelismo, come misura dell'entropia di un buco nero. Se una certa quantità di materia portatrice di entropia cadesse dentro ad un buco nero, l'area dell'orizzonte degli eventi aumenterebbe, così che la somma dell'entropia della materia all'esterno dei buchi neri e dell'area degli orizzonti non scenderebbe mai. Ma se un buco nero possiede un'entropia, allora deve avere anche una temperatura; un corpo con una temperatura superiore allo zero assoluto deve emettere un determinato tasso di radiazioni, in modo da impedire la violazione della seconda legge della termodinamica, di conseguenza **i buchi neri dovrebbero emettere delle radiazioni**.

Ispirandosi alle intuizioni degli astrofisici russi Zel'dovic e Starobinskij, nel 1973 Hawking propone che un buco nero può emettere particelle sulla base delle leggi della meccanica quantistica, mentre fino ad allora al suo studio erano state applicate solo quelle della relatività generale. Lo spazio vuoto, secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg, non può avere valore di campo uguale a zero, poiché deve esserci un minimo di indeterminazione o di fluttuazioni quantistiche. Possiamo pensare ad esse come a coppie di particelle di luce o di gravità che appaiono insieme in un certo istante, si separano e tornano a unirsi, annichilendosi a vicenda; esse vengono chiamate particelle o antiparticelle virtuali. Queste coppie particella-antiparticella tenderanno ad annichilirsi tra loro, ma il campo gravitazionale all'interno di un buco nero è talmente forte che anche una particella reale può avere energia negativa. Di conseguenza la particella virtuale con energia negativa cadrà all'interno dell'orizzonte degli eventi diventando una particella reale e non si dovrà più annichilire con l'altra particella che potrà anche sfuggire all'orizzonte degli eventi sotto forma di particella reale; l'energia positiva della radiazione in uscita verrebbe controbilanciata da un flusso di particelle di energia negativa che cadono nel buco nero. Poiché, secondo l'equazione di Einstein  $E=mc^2$ , l'energia è direttamente proporzionale alla massa, il flusso di energia negativa che entra nel buco nero fa ridurre la sua massa: quindi più il buco nero perde massa, più l'area del suo orizzonte degli eventi diminuisce; questa diminuzione

dell'entropia è compensata dalla radiazione emessa. La **radiazione di Hawking** costituisce quindi una scoperta di enorme importanza in quanto **primo esempio di combinazione della Relatività Generale con la Meccanica quantistica nello studio dei buchi neri**. L'esistenza di una radiazione dei buchi neri sembra implicare che il collasso gravitazionale non è così definito ed irreversibile, ma l'energia della massa catturata dal buco nero, tornerà all'universo sotto forma di radiazione. Poiché le approssimazioni per calcolare le emissioni dei buchi neri cessano di essere valide quando la massa diventa estremamente piccola, il buco nero sembra destinato a sparire. Nel 1974 si ha così la prima indicazione che **la meccanica quantistica avrebbe potuto eliminare le singolarità predette dalla relatività generale**. Detto questo ricordiamo che per poter comprendere l'origine dell'universo sono necessarie leggi che conservino la propria validità anche in corrispondenza dell'inizio del tempo. Se la teoria della relatività generale è corretta all'inizio del tempo avrebbe dovuto esserci un punto di densità e curvatura infinita, in corrispondenza del quale tutte le teorie scientifiche sarebbero venute meno. Ma ciò che ci dicono i teoremi delle singolarità è che il campo gravitazionale diventa talmente intenso che gli effetti della gravità quantistica si fanno rilevanti e la teoria classica non è più adatta a descrivere i primi stadi dell'universo. Bisogna usare una teoria quantistica della gravità, con la quale le leggi scientifiche mantengono validità anche all'inizio del tempo; non bisogna quindi postulare nuove leggi per spiegare la singolarità poiché non è necessario ammettere l'esistenza di alcuna singolarità.

In seguito, a partire dal 1975, Hawking iniziò a sviluppare un approccio quantomeccanico più efficace alla relatività generale e quindi una teoria sulla gravità quantistica. Nella relatività generale i fenomeni vengono descritti attraverso le traiettorie dello spazio-tempo  $(x, y, z, t)$ ; nell'approccio classico una particella si può muovere seguendo un'unica traiettoria, deterministica. Nell'approccio quantomeccanico invece una particella non è mai descritta secondo una legge del moto deterministica, ma da una funzione di probabilità, descritta attraverso una funzione d'onda complessiva. Per poter calcolare queste funzioni di probabilità e quindi descrivere il moto delle particelle nella relatività generale, Hawking decide di seguire la proposta di Feynman di formulare la teoria quantistica in termini di somma delle storie: se prendiamo una particella in movimento da un punto A ad un punto B essa non ha una singola storia, ma deve seguire ogni possibile traiettoria dello spazio-tempo. A ciascuna di queste storie si deve associare una coppia di numeri di cui uno rappresenta le dimensioni di un'onda e l'altro la sua posizione nel cielo, ovvero la sua fase. Per calcolare la probabilità che una particella passi per un determinato punto, dobbiamo sommare le onde associate a ogni possibile storia che passi per quel punto. Nella meccanica quantistica questo modello di "sommazione delle storie" è uno dei problemi fondamentali dal punto di vista dei calcoli, poiché dà luogo ad infiniti che richiedono procedimenti di rinormalizzazione. Dal punto di vista formale Hawking va ad utilizzare un espediente, cioè sostituisce con una variabile  $\tau = it$  (dove  $i$  è l'unità immaginaria) che permette di semplificare i calcoli e lo applica alla Relatività Generale. In relatività un elemento di traiettoria  $ds$  è definito da una metrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$  [dove  $d$  davanti alle coordinate indica un intervallo piccolo a piacere]; questa metrica assomiglierebbe molto a quella euclidea se non presentasse il segno meno. Andando ora a sostituire  $dt$  con  $-i d\tau$  la metrica diventa tutta a "segnatura positiva", quindi esattamente una metrica

euclidea dove le tre coordinate spaziali e la quarta coordinata temporale sono intercambiabili. La coordinata temporale però diviene a questo punto una coordinata di **tempo immaginario**, un tempo nel quale distinzione tra spazio e tempo scompare completamente.

Introdotta la metrica euclidea utilizzando il cambio di coordinate con il tempo immaginario, Hawking nella Quinta lezione presenta una serie di teoremi, che portano ad una nuova visione dell'universo. Egli infatti illustra la possibilità che lo **spazio-tempo abbia un'estensione finita, ma che non abbia alcuna singolarità che lo delimiti come un confine; di conseguenza non ci sarebbero singolarità in presenza delle quali le leggi della scienza vengono meno.**

L'Universo sarebbe quindi completamente autonomo, racchiuso in sé stesso, e non sarebbe soggetto ad alcuna eventuale influenza esterna. **Non sarebbe stato creato, ne verrebbe mai distrutto; esisterebbe e basta.**

Il principio del tempo inoltre sarebbe un punto omogeneo dello spazio-tempo, e quindi l'universo avrebbe iniziato la propria espansione in uno stato ordinato e molto uniforme, ma non totalmente per non violare il principio d'indeterminazione della meccanica quantistica. Devono quindi esserci state delle piccole fluttuazioni nella densità e nella velocità delle particelle, ma, per l'assenza di confini queste erano ridotte al minimo di quanto era richiesto dal principio d'indeterminazione.

Nel tempo reale, in assenza di confini, l'universo dovrebbe quindi comportarsi secondo i modelli inflazionari. Secondo questi l'universo avrebbe avuto un inizio con un periodo di espansione esponenziale, durante il quale le fluttuazioni di densità da piccole avrebbero cominciato poi a crescere. Le regioni con maggiore densità avrebbero subito un rallentamento maggiore fino a quando avrebbero smesso di espandersi per poi cominciare a contrarsi, formando le galassie, le stelle e gli essere viventi. Analogamente alla singolarità del Big Bang, verrebbero rimosse anche le singolarità legate ai buchi neri.

Giunto a queste conclusioni Stephen Hawking comprende che ciò che ancora manca è una teoria che combini la **gravità** con tutte le altre forze, affinché sia possibile definire una **legge** che spieghi l'**origine dell'universo** e quello che siamo.

Sarebbe molto difficile costruire di getto una teoria unificata di tutte le interazioni fondamentali in grado di dare una spiegazione a ogni cosa, ma *“se riusciremo a raggiungerla, potremo realmente comprendere l'universo e la posizione che in esso occupiamo”*.

Il primo che sognò la possibile individuazione di una teoria del tutto fu Albert Einstein, il quale dedicò all'unificazione dell'interazione gravitazionale ed elettromagnetica gli ultimi 35 anni della sua vita, una ricerca che però si rivelò infruttuosa principalmente per tre motivi: in primo luogo poiché all'epoca si sapeva ben poco sulle forze nucleari; in secondo luogo poiché Einstein riconobbe di non essere riuscito a raggiungere l'unificazione delle forze a causa delle difficoltà di calcolo matematico estremamente complesso; infine, poiché Einstein si rifiutava di credere nella realtà della meccanica quantistica. Stephen Hawking però, mostra un cauto ottimismo nella possibilità di essere sempre più vicini alla fine della ricerca delle ultime leggi della natura. Prendendo in considerazione le quattro forze fondamentali, il fisico inglese passa in rassegna le teorie parziali che hanno caratterizzato la storia di unificazione della fisica: la **relatività generale**, la **teoria parziale**

**della gravità**, le **teorie parziali** che governano la **forza debole**, quella **forte** e quella **elettromagnetica**. Le ultime tre possono essere ricombinate nelle **grandi teorie unificate**, le quali però, poiché non comprendono la gravità, non risultano ancora molto soddisfacenti. Il problema principale nell'unificazione della gravità con le altre forze risiede nel fatto che la relatività generale è una teoria classica, che quindi non prevede il principio di indeterminazione della meccanica quantistica, quando invece le altre teorie di unificazione prevedono come componente fondamentale la meccanica quantistica. Di conseguenza diviene **necessaria la combinazione della relatività generale con il principio di indeterminazione**, combinazione che presenta però un problema: il principio di indeterminazione prevede che anche lo spazio vuoto sia pieno di coppie di particelle ed antiparticelle virtuali e, poiché queste coppie dovrebbero avere una quantità di energia infinita, la loro attrazione gravitazionale dovrebbe incurvare l'universo riducendolo a dimensioni infinitamente piccole. In modo analogo, nelle altre teorie quantistiche compaiono delle quantità infinite che vengono però cancellate con un processo detto di "rinormalizzazione"; per quanto riguarda la relatività generale, essa può utilizzare la rinormalizzazione per correggere la forza di gravità e il valore della costante cosmologica; tuttavia la loro normalizzazione non risulta sufficiente per poter rimuovere tutti gli infiniti. Il problema che emerge da questa formulazione matematica consiste quindi nel fatto che esiste una teoria che preveda certe quantità, come la curvatura dello spazio-tempo, realmente infinite, ma, misurandole, si scopre che esse invece sono perfettamente finite. Da allora molti tentativi furono fatti per superare questo problema, a partire dal 1974 con la teoria delle stringhe, successivamente nel 1976 la "supergravità" e la Teoria M, così come la Teoria delle superstringhe ed in particolare la teoria delle stringhe eterotiche, nessuna di queste però è ancora in grado di spiegare tutti i possibili fenomeni della natura e non si può quindi avvalere del titolo di teoria del tutto.

Ma è possibile che esista un'unica teoria del tutto? Le possibilità sembrerebbero tre:

1. Esiste realmente una teoria unificata che un giorno riusciremo a scoprire
2. Non esiste una teoria definitiva, ma infinite teorie specifiche
3. Non esiste alcuna teoria del tutto

L'idea che non esista una teoria definitiva dell'universo, ma solo un'infinita serie di teorie che lo descrivono in modo sempre più accurato, è l'ipotesi che si trova più in accordo con l'esperienza fino ad ora maturata. Sembra però che la gravità possa porre un limite a questa serie superamenti delle teorie unificate fino ad ora conosciute. Se avessimo una particella con un'energia superiore alla cosiddetta energia di Planck, pari a  $10^{19} GeV$ , la sua massa sarebbe così concentrata che essa si separerebbe dall'universo, formando un buco nero. Procedendo verso un'energia sempre più elevata, la serie di teorie dovrebbe alla fine incontrare un limite: ci dovrebbe essere di conseguenza una teoria definitiva dell'universo.

Ma quale significato avrebbe questa nostra eventuale scoperta della teoria definitiva dell'universo?

*"Essa metterebbe fine a un lungo e glorioso capitolo nella storia del nostro sforzo di comprendere l'universo"*; nonostante questo però, continua Hawking, continueremmo lo stesso ad interrogarci sulla natura di Dio, poiché la scienza è in grado di rispondere al come funziona l'universo, ma non sa dare risposte sul perché l'universo esiste. Negli ultimi due secoli infatti, sostiene il fisico, per i filosofi la scienza è diventata

troppo tecnica e troppo matematica, ad eccezione di pochi specialisti, tanto da non riuscire a tenere il passo con il progresso delle teorie scientifiche.

*“Tuttavia, se riuscissimo a scoprire una teoria completa, col tempo tutti – e non solo pochi scienziati-dovrebbero essere in grado di comprenderla, almeno nei suoi principi generali. Saremmo quindi in grado di prendere parte alla discussione sul perché l’universo esiste. E, se trovassimo la risposta a quest’ultima domanda, decreteremmo il definitivo trionfo della ragione umana, poiché allora conosceremmo il pensiero stesso di Dio”.*

## LHC E LEP DEL CERN: RIVOLUZIONARI PER L’UNIFICAZIONE DELLE FORZE

Per poter realizzare finalmente una unificazione totale delle forze dal punto di vista sperimentale *“bisognerebbe utilizzare un acceleratore di particelle più grande dello stesso sistema solare.”*, in grado di raggiungere la cosiddetta energia di Planck, pari a  $10^{19} GeV$ . Attualmente nessun acceleratore di particelle è in grado di raggiungere un così elevato valore di energia, ma ciò non esclude la possibilità che in futuro possano essere realizzati tali acceleratori. Gli acceleratori di particelle del CERN di Ginevra hanno infatti avuto un ruolo fondamentale nel percorso di unificazione delle forze.

### **Il Large Electron-Positron Collider e la forza elettrodebole**

Sheldon Lee Glashow, Steven Weinberg ed Abdus Salam nel 1968 proposero di unificare le forze elettromagnetica e debole nell'unico campo "elettrodebole", lavoro per il quale Weinberg e Salam vinsero il Premio Nobel nel 1979. La loro idea venne confermata dalla scoperta degli astenoni  $W^-$ ,  $W^+$  e  $Z^0$ , mediatori della forza elettrodebole, la cui osservazione fu possibile solo in seguito alla costruzione di acceleratori abbastanza potenti da produrre queste particelle così massive. Il primo segnale di  $W$  si ebbe nel gennaio del 1983 grazie all'utilizzo dell'acceleratore SPS (Super Proton Synchrotron) del CERN durante gli esperimenti UA1 (condotto da Carlo Rubbia) e UA2, realizzati grazie agli sforzi di una grande collaborazione di scienziati. Pochi mesi più tardi avvenne l'osservazione di  $Z$ . Tali risultati furono possibili grazie all'introduzione da parte di Simon van der Meer della tecnica del raffreddamento stocastico. La scoperta fu così sensazionale che Rubbia e van Der Meer furono insigniti del Premio Nobel per la fisica l’anno successivo, nel 1984.

La successiva costruzione di collisori elettrone-positrone come LEP (CERN), Stanford Linear Collider (Stanford Linear Accelerator Center) e di più potenti collisori protone-antiprotone (come Tevatron al Fermilab) alla fine degli anni 1980, in grado di raggiungere energie maggiori rispetto a quelle a disposizione con SPS, ha permesso una più elevata produzione dei bosoni  $W$  e  $Z$  e dunque uno studio più approfondito delle loro proprietà. Questi collisori sono stati anche utilizzati, senza successo, per la ricerca di tracce indirette del bosone di Higgs.

Il LEP è stato il progetto principale al Cern dal 1989 al 2000. Questa macchina è stata in grado di accelerare elettroni e positroni fino ad un'energia di circa 91 GeV, un'energia cinetica che corrisponde a velocità prossime a quelle della luce, sufficiente per la produzione del bosone  $Z$ . La massima energia raggiunta è stata di 209 GeV nel 2000.

L'acceleratore è stato costruito in un tunnel sotterraneo di 27 km, a circa 100 metri di profondità, ed era composto in gran parte da magneti collegati l'uno all'altro lungo tutto il tunnel, che curvano la traiettoria delle particelle accelerate mantenendole in "orbita" nel tubo a vuoto che li attraversava al centro. A intervalli regolari, tra questi magneti noti come dipoli erano interposte le camere di accelerazione che effettivamente fornivano energia alle particelle, e magneti più complessi necessari per guidare il fascio. Questa è la tecnologia del sincrotrone, utilizzata in tutte le macchine del CERN dal PS Booster in poi. Lo scopo di questo progetto è stato osservare cosa succede quando si scontrano elettroni e positroni. Fino alla fine del 1995, l'obiettivo del LEP è stato studiare la particella Z0 (LEP1): dal 1995 in poi l'energia è stata gradualmente aumentata per studiare la produzione di coppie di bosoni

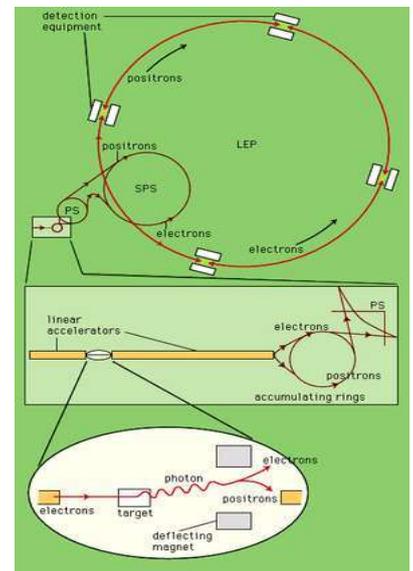


Figura 2: Planimetria del LEP

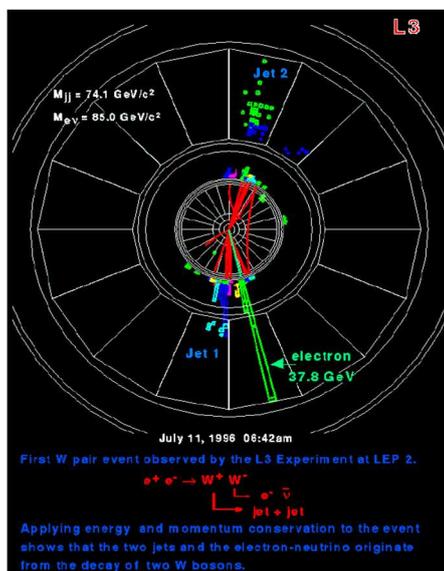


Figura 3: Scontro elettrone-positrone condotto dall'esperimento L3

$W^+ W^-$  e per portare avanti la ricerca della particella di Higgs e di nuovi fenomeni al di là del Modello standard.

Il LEP è costituito da strati di sotto-rivelatori che raccolgono le particelle prodotte dalla collisione elettrone-positrone. Il tubo che trasporta l'elettrone diretto-opposto e i fasci di positroni filtra attraverso il centro di questi rivelatori. I sotto-detector circostanti formano cilindri concentrici con 'tappi' che collegano le estremità per garantire che poche particelle sfuggano. Ciascuno strato presenta un compito specializzato nell'identificazione delle particelle prodotte nella collisione. Questi rivelatori sono L3 (il più vasto del LEP), l'ALEPH, OPAL e DELPHI. Alla fine del 2000 il LEP fu spento e smantellato, e nel suo tunnel iniziò la costruzione del nuovo LHC, che cominciò ad essere sperimentato nel settembre 2008.

## Large Hadron Collider

L'LHC è l'acceleratore di particelle più grande e potente finora realizzato. E' un acceleratore di tipo circolare che può accelerare adroni (protoni e ioni pesanti) fino al 99,9999991% della velocità della luce e farli successivamente scontrare, raggiungendo un'energia di 14 TeV. È costruito all'interno di un tunnel sotterraneo lungo 27 km, a 100 m di profondità in media, situato al confine tra la Francia e la Svizzera, in una regione tra l'aeroporto di Ginevra e i monti Giura, originariamente scavato per realizzare il Large Electron-Positron Collider. LHC è formato da 9.600 magneti, di cui oltre 1600 sono magneti superconduttori in lega di niobio e titanio raffreddati alla temperatura di 1,9 K (circa -271°C) da elio liquido superfluido che realizzano un campo magnetico di circa 8 Tesla, necessario a mantenere in orbita i protoni all'energia prevista. La macchina accelera

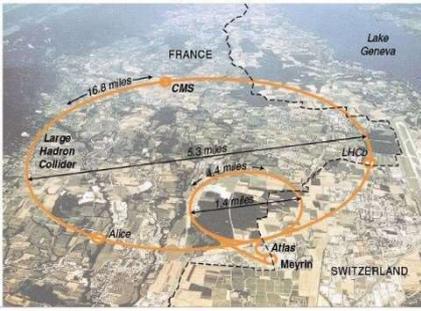


Figura 4: Mappa di LHC

due fasci di particelle che circolano in direzioni opposte, ciascuno contenuto in un tubo a vuoto. Questi collidono in quattro punti lungo l'orbita, in corrispondenza di caverne nelle quali il tunnel si allarga per lasciare spazio a grandi sale sperimentali. In queste stazioni vi sono i quattro principali esperimenti di fisica delle particelle: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (LHC-beauty) ed ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Si tratta di

enormi apparati costituiti da numerosi rivelatori che utilizzano tecnologie diverse e operano intorno al punto in cui i fasci collidono. Nelle collisioni vengono prodotte, grazie alla trasformazione di una parte dell'altissima energia in massa, numerosissime particelle le cui proprietà vengono misurate dai rivelatori. L'entrata in funzione del complesso è avvenuta il 10 settembre 2008, inizialmente ad un'energia inferiore a 1 TeV. Tra gli scopi principali degli studi vi è la ricerca di tracce dell'esistenza di nuove particelle.

Nelle collisioni vengono prodotte, grazie alla trasformazione di una parte dell'altissima energia in massa, numerosissime particelle le cui proprietà vengono misurate dai rivelatori di ciascun esperimento. Questo acceleratore ha consentito finora la scoperta del plasma di quark e gluoni (2010), del Bosone di Higgs (2012), di due stati eccitati della particella  $\Lambda_b^0$  (2016) e del barione  $\Xi_{cc}^{++}$  (2017); esso inoltre potrà dire una parola definitiva sull'esistenza o meno della Supersimmetria, e ci aspettiamo anche importanti risposte circa la natura dell'enigmatica materia oscura e circa l'esistenza o meno di altre dimensioni previste dalla teoria delle stringhe.



Figura 5: Struttura sotterranea di LHC

### ESEMPIO ILLUSTRATIVO - DETERMINARE IL RAPPORTO TRA LA FORZA DI GRAVITÀ E LA FORZA ELETTROMAGNETICA CON CUI INTERAGISCONO UN PROTONE E UN ELETTRONE

L'introduzione simultanea di forze gravitazionali ed elettriche permetterebbe di coglierne gli aspetti analoghi, e, in particolare, il ruolo della *carica gravitazionale* della massa (gravitazionale) nella teoria newtoniana della gravità. Infatti nella famosa:  $F = \frac{G M m}{d^2}$

della forza di gravità, corrisponde l'altrettanto celebre espressione della forza di Coulomb:  $F = \frac{k Q q}{r^2}$

con la differenza che, mentre nel caso gravitazionale la forza è solo attrattiva, nel caso elettrico questa può essere sia attrattiva sia repulsiva a seconda che i segni delle cariche siano, rispettivamente, concordi o discordi. Questo comportamento può essere reso evidente nelle formule se, al posto della distanza  $d$  tra le cariche, sostituiamo la coordinata  $r$  orientata dalla carica scritta con il segno maiuscolo ( $M$  o  $Q$ ) a quella scritta con il segno minuscolo ( $m$  o  $q$ ), intendendo così per  $F$  la forza esercitata  $M$  su  $m$  o da  $Q$  su  $q$ :

$$F_m^{(M)} = -\frac{G M m}{r^2} \qquad F_q^{(Q)} = \frac{k Q q}{r^2}$$

Dove  $G = 6,67 \times 10^{-11} Nm^2 kg^{-2}$  e  $k = 8,99 \times 10^9 Nm^2 C^{-2}$

Date le due espressioni delle forze, gli effetti dinamici su oggetti 'puntiformi' (o approssimativamente tali) derivano dalla seconda legge di Newton della meccanica  $a = \frac{F}{m}$ , e dal fatto che se su uno stesso punto materiale

agiscono più forze, la forza totale è data dalla somma vettoriale delle forze. Ad esempio la forza di attrazione vettoriale tra un elettrone ed un protone (particelle con cariche uguali ma opposte) valgono [con  $r$  orientata dal protone all'elettrone]:

$$F_e^{(p)} = -\frac{G m_p m_e}{r^2} - \frac{k Q_e^2}{r^2} \quad F_p^{(e)} = +\frac{G m_p m_e}{r^2} + \frac{k Q_e^2}{r^2}$$

da cui si ottengono le rispettive accelerazioni:

$$a_e = -\frac{G m_p}{r^2} - \frac{1}{m_e} \frac{k Q_e^2}{r^2} \quad a_p = +\frac{G m_e}{r^2} + \frac{1}{m_p} \frac{k Q_e^2}{r^2}$$

Essendo un protone circa duemila volte più pesante dell'elettrone, l'effetto pratico è che sarà l'elettrone a muoversi verso il protone.

Infatti  $\frac{a_e}{a_p} = \frac{m_p}{m_e} \approx 2000$ . Inoltre è facile verificare come la forza gravitazionale sia assolutamente trascurabile

nelle interazioni tra fra costituenti della materia, in quanto:  $\frac{F_e^{(p,gravità)}}{F_e^{(p,elettricità)}} = 4,4 \times 10^{-40}$

essendo  $Q_e = -Q_p = -1,602 \times 10^{-19} C$

Osservando il rapporto tra le due forze, esse risultano separate l'una dall'altra di 40 ordini di grandezza.

Questa evidente differenza tra le due forze mostra di conseguenza in modo chiaro quanto sia difficile poter unificare la forza di gravità con la forza elettromagnetica.

### SPIEGAZIONE DELLE SCELTE MATEMATICHE OPERATE - UNIFICAZIONE DELLE FORZE E SIMMETRIE, FUNZIONI PARI E DISPARI

In Fisica i cosiddetti Principi di Conservazione descrivono la conservazione nel tempo in un sistema di una grandezza fisica. Le Leggi di Conservazione portano ordine nella Fisica, tanto che Lagrange dedusse l'intera Meccanica dai principi di conservazione di energia, quantità di moto e momento angolare. Ma sarebbe difficile comprendere il legame tra legge di conservazione e simmetrie senza il contributo fondamentale di **Emmy Nöther** (1882-1935), grande scienziata ebrea tedesca, protetta di David Hilbert e Felix Klein non riuscì ad ottenere una cattedra di matematica all'università se non in età già avanzata, poiché era ebrea e donna. Quando la ottenne, la conservò per poco a causa dell'ascesa al potere di Hitler; trasferitasi negli USA, morì prematuramente a causa di una cisti ovarica. Questa geniale scienziata nel 1915 dimostrò quello che da lei prende il nome di **Teorema di Nöther**. Cominciò studiando le simmetrie continue, cioè simmetrie per trasformazioni che possono variare continuamente, come le rotazioni. La Nöther ottenne un risultato sorprendente: **dimostrò che ad ogni legge di conservazione in Fisica corrisponde una simmetria**: se nello spazio e nel tempo non vi sono né punti né istanti privilegiati, allora certe grandezze devono essere le stesse in tutti questi punti. Ma allora, spostandomi da un punto all'altro, non devo notare alcuna differenza: questo avviene se l'universo che mi circonda gode di un qualche tipo di simmetria. In particolare:

- alla conservazione della quantità di moto  $p$  corrisponde la simmetria per traslazione
- alla conservazione del momento angolare  $L$  corrisponde la simmetria per rotazione



Figura 6: Emmy Nöther

- alla conservazione dell'energia  $E$  corrisponde la simmetria per traslazione nel tempo

Il teorema di Nöther fuse **simmetria e leggi di conservazione**; in realtà, questi due importanti pilastri della fisica **non sono altro che aspetti diversi della stessa proprietà fondamentale**.

In effetti si scopre che queste leggi sono le tre grandi simmetrie dello spazio-tempo, ovvero l'invarianza per traslazioni nel tempo, per traslazioni nello spazio e per rotazione. Nessun esperimento ha mai rivelato la benché minima violazione delle tre leggi di conservazione fondamentali. La fiducia dei fisici in queste leggi è pressoché assoluta, poiché in passato ha portato a successi clamorosi. Fu in base a questa fede che la notte del 4 dicembre 1930 il famoso fisico Wolfgang Pauli ipotizzò l'esistenza di una nuova particella, pur di impedire che in un processo di decadimento di un nucleo atomico la conservazione dell'energia venisse violata. La fede di Pauli venne premiata. Qualche anno dopo quell'oggetto misterioso venne effettivamente trovato: il neutrino. Con l'avvento della meccanica quantistica nel secolo scorso, il legame tra simmetria e conoscenza della natura trovò il suo momento più alto e affascinante: si capì, infatti, che la simmetria è così potente da "creare" le *interazioni*, cioè le forze fondamentali presenti nell'universo fin dal Big Bang e, con queste, le particelle che trasmettono queste interazioni, cioè i loro "messaggeri".

Nell'analisi matematica le funzioni che soddisfano delle particolari relazioni di simmetria riguardo ai valori negativi sono le **funzioni pari** e le **funzioni dispari**.

Sia  $y = f(x)$  una funzione a valori reali di variabile reale e sia  $D \subset \mathbb{R}$

Allora la funzione è **pari** se per ogni  $x \in D$  vale l'equazione:  $f(-x) = f(x)$

Il grafico di una funzione pari è simmetrico rispetto all'asse  $y$ .

Esempio:

Prendiamo la funzione  $f(x) = x^2 \log x^2$

Il suo dominio risulta essere  $D \equiv (-\infty; 0) \cup (0; +\infty)$ ;

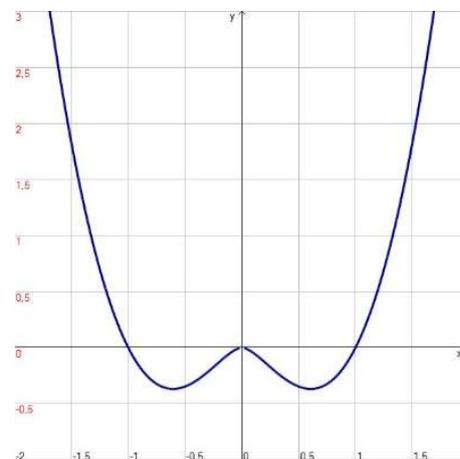
di conseguenza la funzione possiede un dominio simmetrico.

Sostituendo  $-x$  alla variabile  $x$  verifico che la funzione  $f(x)$

è una funzione pari; di conseguenza la funzione è simmetrica

rispetto all'asse  $y$ :

$$f(-x) = (-x)^2 \log(-x)^2 = x^2 \log x^2 = f(x)$$



Sia  $y = f(x)$  una funzione a valori reali di variabile reale e sia  $D \subset \mathbb{R}$  il suo dominio. Allora la funzione è

**dispari** se per ogni  $x \in D$  vale l'equazione:  $f(-x) = -f(x)$

Il grafico di una funzione pari è simmetrico rispetto all'origine degli assi.

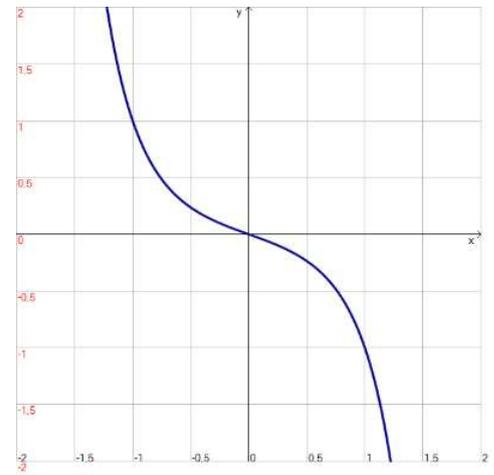
Esempio:

Prendiamo la funzione  $f(x) = -xe^{x^2-1}$

Il suo dominio risulta essere  $D \equiv (-\infty; +\infty)$ ; di conseguenza la funzione può presentare una proprietà di simmetria.

Sostituendo  $-x$  alla variabile  $x$  verifico che la funzione  $f(x)$  è una funzione dispari; di conseguenza la funzione è simmetrica rispetto all'origine degli assi:

$$f(-x) = -(-x)e^{(-x)^2-1} = xe^{x^2-1} = -f(x)$$



## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Stephen Hawking, "La teoria del tutto. Origine e destino dell'universo" (*The Theory of Everything*, 2002), RCS 2003 e BUR, Rizzoli

<https://home.cern/science/accelerators/large-electron-positron-collider>

<https://home.cern/news/press-release/cern/lep-story>

<https://home.infn.it/it/approfondimenti/esperimenti/1384-lhc-large-hadron-collider>

<https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>

[http://www.fmboschetto.it/didattica/Dante\\_e\\_la\\_scienza/Raphel.htm](http://www.fmboschetto.it/didattica/Dante_e_la_scienza/Raphel.htm)

<https://www.asimmetrie.it/index.php/il-mistero-della-simmetria>

<https://digilander.libero.it/roberto20129/fisica/simmetrie.html#particelle>